

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

POJEZD ROBOTICKÉHO VOZÍTKA TRAXSTER S VYUŽITÍM BLDC MOTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV SVAČINA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

POJEZD ROBOTICKÉHO VOZÍTKA TRAXSTER S VYUŽITÍM BLDC MOTORŮ

TRAXSTER ROBOTIC VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MIROSLAV SVAČINA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RICHARD RŮŽIČKA, Ph.D.

BRNO 2010

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o robotickém vozítku Traxster, navrhuje jeho úpravu na změnu pohonu ze stejnosměrných motorů na BLDC motory (bezkartáčové stejnosměrné motory). Diskutuje hardware nutný k realizaci regulátoru, analyzuje metody jejich řízení a problémy spojené s nimi, zvláště pak problémy s řízením motoru v nízkých otáčkách.

Abstract

Bachelor's thesis deals with the robotic vehicle Traxster, designs its modification for using BLDC motors instead of DC motors for traction. Discusses necessary hardware for implementation of the controller, analyses methods of motor control and problems connected with it, especially the problems with the motor control at low speed.

Klíčová slova

Robot Traxster, BLDC motor, řízení pohonů, absolutní rotační enkodér, bezkartáčový stejnosměrný motor

Keywords

Robot Traxster, BLDC motor, traction control, absolute rotary encoder, brushless direct current motor

Citace

Miroslav Svačina: Pojezd robotického vozítka Traxster
s využitím BLDC motorů, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2010

Pojezd robotického vozítka Traxster s využitím BLDC motorů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Richarda Růžičky, Ph.D.

.....
Miroslav Svačina
19. května 2010

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Richardu Růžičkovi za vedení práce, panu Ing. Grigoriji Dvorskému za poskytnutí hardwaru a odborné pomoci a panu Tomáši Čudrnákovi za poskytnutí technického zázemí ve firmě EVC Group s. r.o. v průběhu tvorby této práce.

© Miroslav Svačina, 2010.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Navržené řešení	3
2	Robot Traxster	4
2.1	Původní konstrukce a možnosti	4
2.1.1	Konstrukce	4
2.1.2	Hardwarové vybavení	5
2.1.3	Periferie	5
2.2	Přestavba na pohon BLDC motorem	7
2.2.1	Motor a jeho uložení	7
3	BLDC motory	10
3.1	Základní vlastnosti a srovnání	10
3.2	Konstrukce motoru	11
3.3	Princip	12
3.3.1	Komutační sekvence	12
4	Metody řízení BLDC motoru	13
4.1	Bezsenzorové řízení	13
4.2	Senzorové řízení	14
4.2.1	Hallova sonda	14
4.2.2	Inkrementální rotační enkodér	15
4.2.3	Absolutní rotační enkodér	16
4.3	Řídicí křivky	16
4.3.1	Lichoběžníkové řízení	16
4.3.2	Sinusové řízení	16
4.3.3	Navržené řešení	17
5	Enkodéry	18
5.1	Konstrukce	18
5.2	Hallovy sondy	19
5.3	Optické inkrementální	19
5.3.1	Jednoduché	20
5.3.2	Kvadrturní	20
5.4	Optické absolutní	21
5.4.1	Avago AEAS 7000	22

6	Hardware regulátoru	23
6.1	Požadavky na hardware	23
6.1.1	Mikrokontrolér	23
6.1.2	Napájecí zdroj	23
6.1.3	Silové spínací obvody	24
6.2	Zpětné vazby	25
6.2.1	Čidla proudu	25
6.2.2	Obvod pro měření BEMF	25
6.2.3	Další obvody	25
6.3	Výběr regulátoru	25
7	Software regulátoru	27
7.1	Základní architektura	27
7.2	SPI rozhraní	27
7.3	Generování PWM	28
7.3.1	Obsluha přerušení	28
7.4	Zpracování zpětných vazeb	29
8	Závěr	30
8.1	Zhodnocení	30
A	Obsah CD	32
B	Technické údaje	33

Kapitola 1

Úvod

Ekologie a ochrana životního prostředí jsou slova, se kterými se v poslední době setkáváme stále častěji. Mezi největší znečišťovatele ovzduší se řadí kromě průmyslu také dopravní prostředky. Současným, ale hlavně budoucím trendem je přecházet v dopravě na vozidla produkující minimum škodlivých emisí, proto jsou vkládány nemalé prostředky na vývoj hybridních a čistě elektrických pohonů. Momentálně má prakticky každá větší automobilka alespoň koncept elektricky poháněného vozidla. S návrhem elektromobilů jde ruku v ruce vývoj pohonného systému. Jako momentálně nejlepší druh motoru se jeví bezkartáčový stejnosměrný motor, který se již delší dobu používá v nízkovýkonových aplikacích jako například pohon ploten pevných disků, modelářství apod. Avšak řízení BLDC motoru (Brushless DC motor) pro automobilový průmysl má specifické požadavky.

Tato práce si klade za cíl navrhnout metodu řízení BLDC motoru v režimu nízkých otáček s důrazem na minimalizaci nežádoucích jevů jako je např. nerovnoměrný točivý moment apod. K demonstraci této aplikace bude sloužit přestavěné robotické vozítko Traxster.

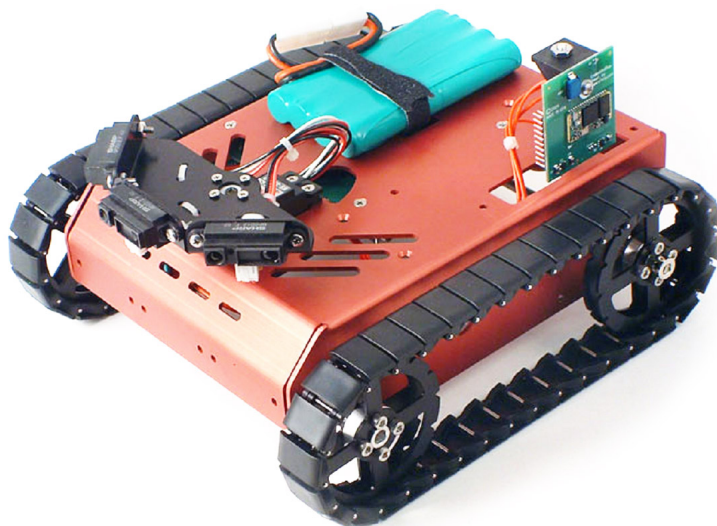
1.1 Navržené řešení

Vzhledem k zadání této práce, která předpokládá plynulý chod motoru v nízkých otáčkách se zátěží, je nutné aby regulátor motoru dostával v každém okamžiku informaci o poloze motoru. Tato informace a její přesnost, spojená se správně zvoleným algoritmem řízení motoru je kritická pro /ideálně/ konstantní točivý moment dodávaný motorem. Pro získání této polohy je nutné osadit motor enkodérem. Běžně se používají Hallovy sondy uvnitř motoru, avšak jejich přesnost je nedostatečných 60° na jednu elektrickou otáčku (bude vysvětleno později). Proto byl pro zjištění použit absolutní rotační enkodér Avago AEAS-7000, který může podat informaci o poloze v přesnosti až 16 bitů na jednu mechanickou otáčku. Kvůli dostupnosti, jednoduchosti programování a ceně byl použit regulátor firmy MGM Compro A-SERIES 7. Byly nutné jeho hardwarové úpravy pro komunikaci s enkodérem, která je realizována sériovým rozhraním SPI. Součástí této práce je také kompletní software pro zmíněný regulátor.

Kapitola 2

Robot Traxster

Toto robotické pásové vozítko od společnosti Robotics Connection[7] je konstruováno jako modulární stavebnice, která nabízí poměrně široké možnosti modifikace. Je určeno jak k výukovým účelům, tak pro nadšence v oblasti hobby robotiky. Celé zařízení je navrženo s ohledem na minimalizaci hardwarových úprav uživatelem tak, aby se mohl soustředit pouze na softwarovou část, vyvíjenou v prostředí MicrosoftTM .NET framework.



Obrázek 2.1: Robot Traxster v původním provedení [10]

2.1 Původní konstrukce a možnosti

2.1.1 Konstrukce

Šasi robota je tvořeno laserem obráběným hliníkovým plechem, ohnutý do příslušného tvaru. Otvory v tomto šasi slouží k upevnění jednotlivých komponent robota, jako jsou osy náprav, motory s převodovkami, deska plošného spoje s řídicí elektronikou, senzory apod.

Původní pohon je realizován dvěma stejnosměrnými motory s převodovkami, které jsou

přímo spojeny se zadními koly. Kola jsou opatřena pásy, které umožňují robotu jak pohyby vpřed a vzad, tak libovolné natáčení, jehož poloměr závisí pouze na velikosti rozdílu rychlostí obou motorů (tzv. diferenciální řízení), tudíž není třeba žádného dalšího zatačecího mechanismu. Motory jsou také osazeny optickými kvadrturními enkodéry (tento typ enkodérů je detailněji popsán v kapitole 5.3.2), jež rozšiřují možnosti řízení motorů. Typicky jde o přesnou regulaci otáček a díky znalosti průměru kola je možné implementovat různé algoritmy využívající odometrie apod.

2.1.2 Hardwarové vybavení

Standardně je kit dodáván s řídicí deskou – tzv. Serializer[8], který sestává z mikrokontroléru, H-můstku pro řízení motorů, patice pro připojení senzorů a další podpůrné elektroniky. Mikrokontrolér implementuje řízení nízkourovňových periferií, jako jsou motory, serva, enkodéry, senzory vzdálenosti nebo moduly pro komunikaci s PC. Mikroprocesor dále implementuje protokol ovládání periferií přes rozhraní RS232, který zpracovává PC aplikace. Serializer také nabízí různé možnosti komunikace s PC prostřednictvím vyměnitelných modulů:

- RS232 modul
- USB modul
- Bluetooth modul
- XBee modul

Obrovskou výhodou posledních dvou modulů je bezesporu možnost programovat robota bez nutnosti jeho pevného propojení kabelem s PC.

2.1.3 Periferie

Aby bylo možné přizpůsobit robota širokému spektru aplikací, je možné připojit například následující periferie.

Servomotor

Serva mají využití v robotice a v modelářství prakticky všude, kde je třeba mechanicky manipulovat nebo relativně přesně nastavovat polohu částí robota nebo modelu. Jde v podstatě o zpřevodovaný stejnosměrný motor se zpětnou vazbou. Tím je schopno udržet jeho otáčivé rameno v zadané poloze, pokud na něj nepůsobí větší točivý moment, než je samo schopno dodat. Požadovaná poloha se nastavuje pulzně šířkovou modulací (PWM). Tuto je mikroprocesor přímo schopen generovat.

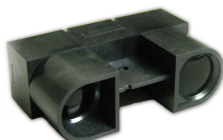


Obrázek 2.2: Modelářský servomotor [10]

Infračervený senzor vzdálenosti

Pracuje na principu zpracování úhlu odraženého infračerveného světla od překážky, vyslaného infračervenou LED diodou senzoru.

Tato čidla vynikají svou jednoduchostí a snadným odečtem dat, který je zpravidla řešen pouze analogovým výstupním signálem. Jejich nevýhoda spočívá v nepřesnosti naměřených vzdáleností, vzhledem k tomu, že hodnoty jsou ovlivňovány jak intenzitou okolního světla, tak optickými vlastnostmi plochy, od které se infračervený paprsek odráží.



Obrázek 2.3: Infračervený senzor vzdálenosti [10]

Ultrazvukový senzor vzdálenosti

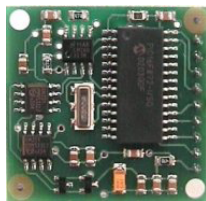
U těchto senzorů se využívá rychlosti šíření zvukových vln v běžném prostředí (ve vzduchu). V principu se vyšle ultrazvukový impuls do prostoru a čeká se, až se vrátí zpět, přičemž se počítá doba této události. Dle času se poté vypočítá vzdálenost. Výhodou oproti infračerveným senzorům je vyšší přesnost a hlavně měřitelný rozsah vzdáleností, který se pohybuje řádově od několika centimetrů do jednotek metrů. Nevýhodou je potom nutnost složitější elektroniky přímo na senzoru. Komunikace mezi robotem je zde realizována sběrnici I²C.



Obrázek 2.4: Ultrazvukový senzor vzdálenosti [10]

Elektronický kompas

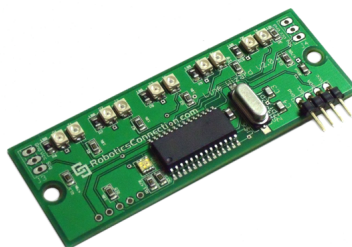
V tomto případě je deska plošného spoje kompasu osazena citlivými senzory magnetického pole, které jsou schopny detekovat i to zemské. Mikroprocesor převede jejich signály na úhlové stupně, odpovídající azimutu natočení kompasu. V kombinaci s přesnou odometrií tato periferie značně rozšiřuje schopnosti orientace robota v prostoru. S řídicí deskou komunikuje také přes sběrnici I²C.



Obrázek 2.5: Elektronický kompas CMPS03 [10]

senzory pro sledování dráhy

Jedná se o desku plošného spoje osazenou pěti optickými senzory, schopnými změřit množství odraženého světla. Tím mohou dávat data, zda se před nimi nachází tmavá nebo světlá plocha. V mikroprocesoru se data z jednotlivých senzorů zpracují a serializují. Programovou logikou robota je možné vytvořit např. aplikaci, kdy robot sleduje černou čáru na podložce, po které se pohybuje. Jako výstupní kanál je použita sběrnice I²C.



Obrázek 2.6: Deska plošného spoje se senzory pro sledování dráhy [10]

2.2 Přestavba na pohon BLDC motorem

Vzhledem k tomu, že šasi robota Traxster není určeno k používání jiného druhu pohonu, než dodávaného, bylo nutné k účelu demonstrace řízení BLDC motoru učinit na robotu určité konstrukční úpravy.

Primárním cílem je ukázat možnosti regulace BLDC motoru, proto jsem přistoupil k omezení pohybu robota na směr vpřed a vzad, aby bylo možné použít pouze jeden motor který pohání oba pásy. Dalším důvodem byla také nákladnost celého pohonného zařízení (BLDC motor, absolutní rotační enkodér, hardware regulátoru), které by muselo být pořízeno ve dvou kusech, přičemž výuková hodnota tohoto kroku by byla zanedbatelná.

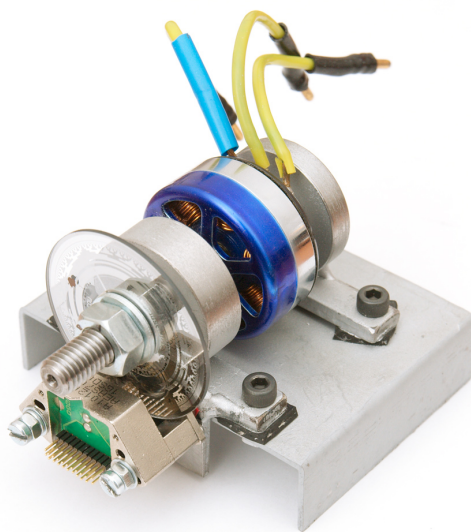
2.2.1 Motor a jeho uložení

Pro motor, enkodér a převodové kolo bylo nutné vyrobit speciální přípravek, aby bylo možné spřažení enkodéru s motorem a robotem.

První prototyp

Veškerý vývoj a testování softwaru byl závislý na korektních datech, přijímaných od enkodéru. K tomu byl, z větší části ručně, vyroben prototyp přípravku pro uchycení motoru a enkodéru, jež vyžadoval poměrně vysokou přesnost výroby, aby bylo možné správně uložit čtecí hlavu enkodéru. Pro uchycení kódového disku byla vyrobena hřídel, která se poté nalisovala na původní hřídel motoru. Přesnost této součástky (průměr, ale zejména kolmosti) musela být na $10\mu\text{m}$, jelikož měla kritický dopad na axiální a radiální úchylky kódového disku enkodéru.

V praxi se ukázalo, že přesnost prvního prototypu je nedostatečná a data zasílaná enkodérem obsahují velké procento chyb, které v takové výši nebylo možno softwarově korigovat.

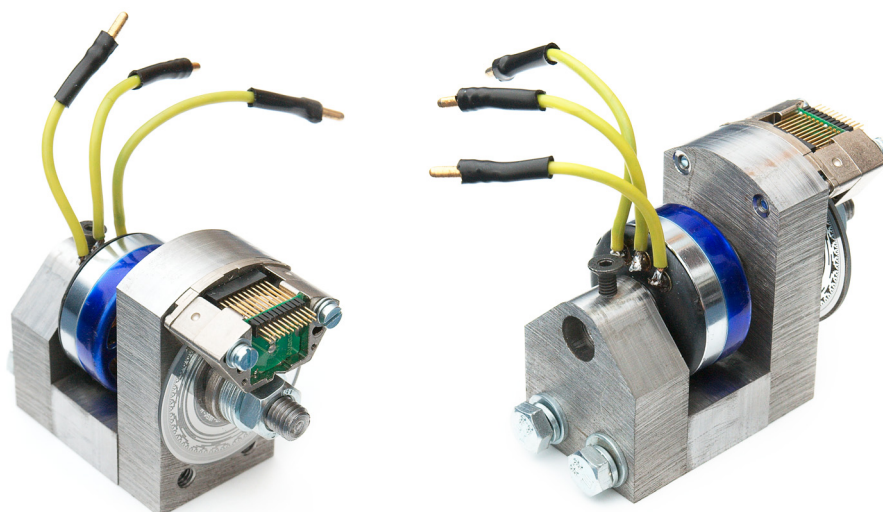


Obrázek 2.7: První prototyp uložení motoru a enkodéru

Druhý prototyp

Konstrukce druhého přípravku je již založena na přesně frézovaných a vrtaných komponentech. Oproti prvnímu prototypu zde není použito ložisko, ale přesný třecí spoj. Tento je v demonstrativní aplikaci použitelný, v praxi by ale měl minimální životnost. Ačkoliv má tato konstrukce vysokou přesnost a celkovou tuhost (je vyrobena z kovové plotny o tloušťce 15 mm), její nevýhodou je hmotnost, jež je další problém, který omezuje by její praktické použití v robotice.

Zde však funkci splnila a její uchycení na šasi robota Traxster a následné spřažení s hnanou nápravou pomocí plastových ozubených kol nečinilo velké potíže.



Obrázek 2.8: Druhý, průmyslově frézovaný prototyp uložení motoru a enkodéru

Kapitola 3

BLDC motory

V této kapitole jsem čerpal zejména z dostupných zdrojů [11] a [6] a vlastních znalostí a zkušeností.

Tento druh motorů se již delší dobu používá v aplikacích, kde je důraz na minimalizaci prostoru, který motor zabírá, jeho životnost nebo na přesnou regulaci otáček. Typickým příkladem jsou motory pohonu ploten v pevných discích nebo v optických mechanikách pro pohon média. Do dalších aplikací v průmyslu se teprve dostávají, vzhledem k tomu, že jsou zde momentálně rozšířeny asynchronní motory, jejichž vlastnosti většině průmyslových aplikací plně dostačují.

Existují ovšem oblasti, kde je vhodné zkloubit výhody stejnosměrných a asynchronních motorů. Typicky jde o aplikace, kde velmi záleží na hmotnosti celého systému, jeho spolehlivosti, bezúdržbovosti a efektivnosti. Takovým příkladem mohou být, stále se rozvíjející, trakční pohony různých druhů elektro vozidel od elektrokol, přes elektroskútry a elektromobily až po elektrobusesy. Zde jsou kladeny nároky nejen na vlastnosti uvedené výše, ale také na výkon vůči hmotnosti a velikosti motoru, konstantní točivý moment od minimálních otáček, hladkost chodu a druhotně také na hlučnost apod.

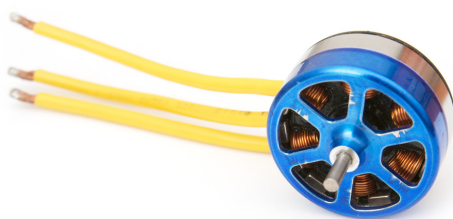
3.1 Základní vlastnosti a srovnání

Běžné stejnosměrné motory využívají pro komutaci kartáče nebo uhlíkové destičky, které převádí proud tím, že se třou o měděné plošky na komutátoru, jenž je pevně spojen s rotorem. Motor je udržován v chodu předstihem magnetického pole vinutí oproti magnetickému poli statoru. Tento předstih je dán úhlem natočení uhlíků oproti rotoru. Komutátor je však zdrojem ztrát, tepla, jiskření a tím i elektromagnetického rušení, což ve výsledku citelně snižuje efektivitu motoru, uhlíky se třením opotřebovávají, takže je nutné je měnit.

BLDC motory žádný takový komutátor nemají. Tímto je možné odstranit většinu výše uvedených nežádoucích vlastností. Odpadají jakékoliv ztráty na komutátoru, zvýší se účinnost, sníží hlučnost, zvýší životnost atp. Oproti tomu je však nutný systém, který bude komutátor zastupovat.

Tímto systémem je regulátor, který v sobě implementuje komutační logiku, případně přidává další funkce. Proto se také BLDC motory někdy nazývají elektronicky komutované. Metody řízení motoru a hardwarové nároky na regulátor jsou popsány dále.

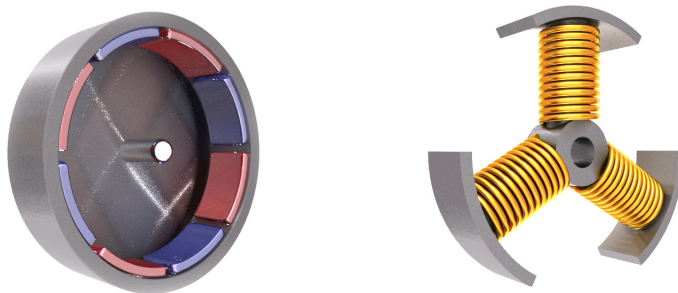
Co se týče srovnání s asynchronními motory, jsou BLDC ve výhodě zejména kvůli poměru hmotnosti a výkonu, dále také v jednodušším řízení a lepším momentovým a výkonovým charakteristikám.



Obrázek 3.1: Ukázka BLDC motoru s rotačním pláštěm

3.2 Konstrukce motoru

Bezkomutátorové stejnosměrné motory (Brushless Direct Current Motor – BLDC) vycházejí konstrukčně z běžných stejnosměrných motorů, mají tedy také permanentní magnety, zpravidla neodymové, které jsou, oproti klasickým feritovým, schopny dodat vyšší magnetický tok při stejných rozměrech. Díky tomu je možné zmenšit rozměry a hmotnost celého motoru při zachování stejného točivého momentu.



Obrázek 3.2: Zjednodušený model rotoru a statoru BLDC motoru

Magnety jsou u většiny BLDC motorů uloženy v rotačním plášti, tedy oproti stejnosměrným motorům plní funkci rotoru a stator tvoří fázová vinutí uvnitř motoru. Existují i motory, které mají rotor uvnitř a vnější stator tvořený vinutími, ale vzhledem k nedostatečnému prostoru v rotoru je do něj možno zasadit pouze malé počty pólových dvojic magnetů, což se ve výsledku projeví na zvýšení počtu nominálních mechanických otáček. Motor může poté dosahovat řádově až desetitisíce otáček za minutu. To v praxi málokdy využijeme. Běžně se tedy počet otáček redukuje zvýšením počtu pólových dvojic v plášti, kde je prostoru dostatek. Dále se budu zabývat pouze konstrukcí motorů s rotačním pláštěm, jelikož jsou vhodnější pro nízkootáčkové aplikace.

Dvojic magnetů (pólových dvojic) je možné dát do rotoru libovolné množství, přičemž výsledné mechanické otáčky se dají vypočítat podělením elektrických otáček (generovaných regulátorem) počtem pólových dvojic.

Ve statoru je vinutí tvořené zpravidla měděnými dráty. Ty jsou navinuty na kovová jádra, která přenášejí indukovaný magnetický tok co nejbližší k magnetům v rotoru. Přestože se můžeme v některých jednoduchých aplikacích setkat s jednofázovými BLDC motory, běžně se používají tři fáze, jejichž cívky jsou zapojeny do hvězdy. Více fází se prakticky nepoužívá.

Roztočíme-li motor vnější silou, začne se chovat jako třífázový synchronní generátor. Na jednotlivých fázích tedy můžeme měřit sinusový průběh napětí, přičemž fáze jsou od sebe posunuty o 120° . Částečně se tohoto generátorového módu využívá v bezsenzorovém řízení nebo také při rekuperaci brzdě energie (u bateriově napájených systémů), kdy je tato přiváděna zpět do baterií. Např. u silničních vozidel je tímto možné nejenom použít motoru k brždění, ale také zároveň k nabíjení baterií a tím i k prodloužení dojezdu vozidla.

3.3 Princip

Základní princip mechanického pohybu motoru je dán vzájemným odpuzováním/přitahováním magnetických polí. Na straně rotoru je toto pole dáno pevně permanentními magnety, ve statoru je pak indukováno pomocí elektrického proudu, protékajícího cívkami fázového vinutí. Když přivedeme kladný pól napájení na jednu z fází a záporný pól na druhou, rotor má tendenci se otočit do směru indukovaného magnetického pole statoru. Existuje základní 6-ti stupňová komutační sekvence, kdy jednotlivé fáze přepínáme buď k zemi zdroje stejnosměrného elektrického proudu nebo k jeho kladné větvi. Po jejím skončení vykoná motor kompletní elektrickou otáčku. Vhodným časováním přepínání jednotlivých fází komutace se snažíme udržet obě magnetické pole otočené oproti sobě o 90° . Při tomto úhlu natočení produkuje motor maximální točivý moment. Je-li naopak úhel mezi magnetickými poli nulový, výsledný točivý moment je taktéž roven nule.

3.3.1 Komutační sekvence

Jde o 6 po sobě jdoucích konfigurací napájení jednotlivých fází, přičemž v každé z nich se jedna z fází připojuje na kladný pól napájecího zdroje, druhá na záporný pól a třetí zůstává nepřípojená (případně je využita pro detekci elektromotorického napětí při užití bezsenzorové regulace). Po každé z jednotlivých částí sekvence by motor zůstal v jedné ze 6 rovnovážných poloh, naším cílem je však otáčení motoru, proto části sekvence navazují plynule za sebou. Označíme-li si jednotlivé fáze motoru *A*, *B*, *C*, shrnuje následující tabulka konfiguraci kompletní komutační sekvence pro otočení motoru o jednu elektrickou otáčku.

Část č.	Fáze		
	A	B	C
1	PLUS	MINUS	nepřípojeno
2	PLUS	nepřípojeno	MINUS
3	nepřípojeno	PLUS	MINUS
4	MINUS	PLUS	nepřípojeno
5	MINUS	nepřípojeno	PLUS
6	nepřípojeno	MINUS	PLUS

Kapitola 4

Metody řízení BLDC motoru

V této kapitole bylo použito zdrojů Atmel [2], [1] a Freescale Semiconductor inc. [5].

Existuje několik základních metod řízení BLDC motoru, z nichž každá má své pro a proti. Výběr metody závisí na konkrétní aplikaci, požadavcích na chování motoru, charakteristice zátěže apod. Jedno z dělení metod řízení BLDC motoru bere v úvahu, zda je jsou použity senzory, které nám udávají jistým způsobem polohu motoru, nebo se pro detekci polohy využívá elektromotorické napětí na fázi, která není právě připojena. Senzorů může být použito několik typů a jsou popsány dále.

Dalším kritériem pro rozdělení způsobů řízení je tvar napěťové křivky procházející jednotlivými fázemi motoru. Nejjednodušší z nich je lichoběžníkové řízení, kdy jsou fáze pouze spínány a rozpínány, případně modulovány PWM, ale vždy je jedna z fází odpojená. Toto řízení není příliš dokonalé a výsledkem bývají vibrace motoru, nižší účinnost, hluk apod.

Dále řízení dokonalejší – sinusové, které plynule řídí proud tekoucí do jednotlivých fází, přičemž – jak název napovídá – tvar křivky proudu tekoucího do motoru je víceméně podobný sinusoidě. Algoritmem tohoto řízení můžeme omezit většinu výše uvedených nevýhod. Získáme plynule se otáčející motor se sníženou hlučností, schopný dodávat v každé poloze prakticky konstantní točivý moment. BLDC motor řízený touto metodou se někdy nazývá synchronní motor s permanentními magnety (PMSM = Permanent Magnet Synchronous Motor).

4.1 Bezsenzorové řízení

Jak bylo popsáno výše, v jednotlivých komutačních sekvencích jsou vždy připojeny pouze 2 ze 3 fází. Třetí, nepřipojená fáze, de facto pracuje v generátorovém módu, kdy se na její cívce indukuje napětí (tzv. zpětné elektromotorické napětí, neboli BEMF = Back Electromotive Force). Měřením tohoto napětí je možné určit okamžik pro korektní komutaci. Konkrétně se jedná o okamžik, kdy generované napětí začíná působit proti napětí dodávanému do systému, jde tedy v praxi o detekci průchodu nulou. S měřením BEMF je však spojeno několik problémů.

BEMF není možné měřit proti zápornému pólu napájecího zdroje, korektním protipólem pro měření je střed fází motoru. Tento střed však nebývá z motoru fyzicky vyveden, proto je nutné si jej vytvořit.

Průběh BEMF má tvar sinusoidy, přičemž perioda je závislá na úhlové rychlosti otáčení motoru a amplituda jednak na indukčních vlastnostech motoru a také na rychlosti otáčení.

Máme-li vyvedený střed motoru, zdálo by se, že nyní stačí připojit pouze jednotlivé měřicí

signály z fází k AD převodníku a detekovat průchod nulou. V běžných regulátorech, které často dosahují několika desítek tisíc elektrických otáček za sekundu je problém v rychlosti vzorkování a tak se používá komparátor, který nám oznámí pouze průchod nulou. Tato informace však není dostačující sama o sobě, jelikož např. při nízkých otáčkách motoru mohou přicházet falešné informace od komparátoru a mohlo by dojít k poškození motoru nebo regulátoru vlivem proudové špičky, způsobené nesprávně načasovanou komutací. Je proto nutné tu informaci filtrovat a řídit se jí pouze v případě, že jsme si jí jisti její korektností.

Dalším problémem je roztočení motoru z nulových otáček. V okamžiku, kdy motor stojí, nemůžeme měřit BEMF, takže je nutný odlišný způsob regulace. Používá se sekvence pevně časovaných komutací, při kterých se motor pomalu roztáčí a začíná generovat BEMF. Avšak z důvodu neznalosti polohy rotoru není možné v této rozběhové fázi využít plný výkon, protože hrozí nebezpečí zničení hardwaru nekorektní komutací. Očekává se tedy proto minimální zátěž na hřídeli motoru, aby se motor vůbec dal, vlivem malé síly, do pohybu.

Již tímto faktem jsou omezeny aplikace použití bezsenzorového řízení. Nezáleží-li nám na točivém momentu při roztáčení motoru a hodláme-li provozovat motor spíše ve vyšších otáčkách s malou až střední zátěží, je tato metoda ideální. Také proto, že kromě umělého vyvedení středu motoru není nutný žádný další hardware a algoritmus řízení, ačkoliv je poněkud složitější, je možné použít pro různé výkonné motory, ať jsou zapojené do hvězdy nebo trojúhelníku.

Pro řízení motoru v nízkých otáčkách s konstantním točivým momentem je tato metoda však naprosto nevhodná.

4.2 Senzorové řízení

BLDC motory je možné osadit různými typy enkodérů, které nám udávají polohu rotoru vůči statoru. V závislosti na použitém typu enkodéru se rozděluje enkodéry podle způsobu interpretace na relativní (inkrementální) a na absolutní, dále je různá také přesnost udání polohy. Nejčastěji se s BLDC motory využívají Hallovy sondy, které bývají umístěné uvnitř motoru jako tzv. pólové nádstavce. Další možností je jejich umístění vně motoru na společnou hřídel, kde se obvykle umísťují i ostatní typy enkodéru.

Problémem při používání enkodérů s motory je jednak zvýšení ceny celého systému, ale také spolehlivost. Většina typů enkodérů vyžaduje velmi přesnou montážní polohu a setrvání v ní po celou dobu životnosti motoru, což může být velmi náročné, vzhledem k poměrně silným vibracím, produkovaným běžnými systémy. Dalším problémem je silné magnetické pole, kterému jsou vystaveny enkodéry, které jsou umístěny uvnitř nebo v bezprostřední blízkosti motoru. Nutné jsou poté filtrace a odrušení signálů vedených od nich.

Enkodéry jsou pro běh motoru v tomto režimu řízení kritické, tudíž je nutné zajistit, aby jejich spolehlivost byla maximální. Například pootočení optického enkodéru na společné hřídeli s motorem by mohlo znamenat úplnou nefunkčnost motoru nebo v horším případě zničení hardwaru. Proto je také vhodné implementovat softwarové ochrany, které zajistí, že při nesprávné funkci enkodéru motor zastaví.

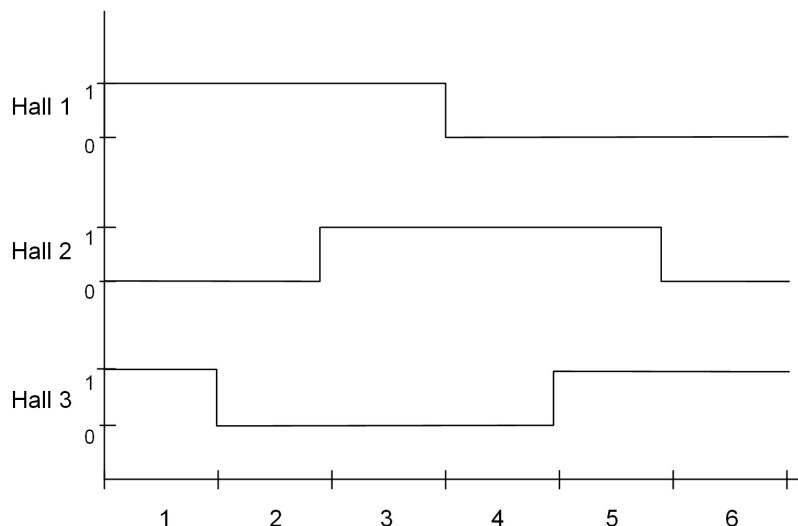
Podrobnější popis principů funkce a konstrukce enkodérů bude popsán v kapitole 5, zde bude probírána vhodnost jednotlivých druhů enkodérů ve vztahu k řízení BLDC motoru.

4.2.1 Hallova sonda

Hallovy sondy jsou nejpoužívanějším enkodérem užívaným při řízení BLDC motoru. Jejich výhodou je relativní jednoduchost montáže a poměrně velký přínos informace pro regulátor

motoru.

Hallovy sondy se často umísťují přímo aktivní části motoru, tak aby jejich odezva byla řízena permanentními magnety motoru. Druhou možností je umístění na společné hřídeli motoru. Tento způsob je sice náročnější na prostor, avšak dovoluje sondy umístit přesně tak, aby přechody (hrany) výstupních signálů jednotlivých sond přímo určovaly okamžiky komutace.



Obrázek 4.1: Ukázka signálu z Hallových sond pro jednu elektrickou otáčku motoru.

Problémem při užití Hallových sond je především zarušení, jsou-li umístěny přímo vevnitř motoru, kde je silné magnetické pole. Dále také vodiče, vedoucí od těchto sond jsou více náchylné na mechanické poškození, než silové fázové vodiče a bude u nich proto docházet statisticky k častějším poruchám.

Úhlová přesnost Hallových sond je poměrně malá – 60° na jednu elektrickou otáčku, což bez dalšího enkodéru znemožňuje jemnou regulaci proudu, procházejícího jednotlivými fázemi motoru. Právě přesnost určení polohy v nulových nebo nízkých otáčkách je kritická pro udržení konstantního točivého momentu, tudíž užití Hallových sond není vhodné pro tuto aplikaci.

4.2.2 Inkrementální rotační enkodér

V řízení BLDC motorů není příliš rozšířen, vzhledem k úzké oblasti aplikací, kde může být využitelný. Pokud už se užívá, jedná se hlavně o enkodéry vybavené drahou, udávající pomocí jednoho krátkého pulzu nulovou polohu (indexová dráha). Další snímací dráhy mohou být poměrně jemně členěné a známe-li počet impulsů od bodu nula a celkový počet impulsů na otáčku, je možné si jednoduše dopočítat absolutní polohu.

Hlavní nevýhoda tohoto enkodéru je tedy zřejmá – po zapnutí systému není známa absolutní poloha motoru a v nejhorším případě trvá nalezení indexovacího bodu téměř celou jednu mechanickou otáčku, což může být nepřijatelné. Řešením jsou enkodéry s vnitřní pamětí, které si pamatují poslední polohu i po vypnutí systému.

4.2.3 Absolutní rotační enkodér

Absolutní rotační enkodér je schopen regulátoru poskytnout velmi přesnou informaci o poloze motoru v každém okamžiku, tedy i ihned po zapnutí systému, což je jeho hlavní výhodou. Na druhé straně ovšem stojí hned několik faktorů jako například cena, která může být srovnatelná se samotným motorem, složitost konstrukce a tím pádem i spolehlivost, u modulárních systémů nutnost velmi přesné kalibrace a v neposlední řadě způsob předávání dat regulátoru.

U předchozích typů enkodérů se většinou jednalo jen o předzpracované signály, což by u absolutních enkodérů bylo velmi nešikovné, jelikož jejich rozlišení bývá často kolem 10 bitů na otáčku a tomuto číslu odpovídá i počet jejich drah. To s sebou nese nutnost vést vodič od každé dráhy k regulátoru a následné zpracování těchto signálů. Jinou možností je zpracování a serializace signálů od jednotlivých drah přímo v enkodéru a komunikace po některém ze sériových rozhraní, například SPI.

I přes tyto nevýhody jsou absolutní enkodéry ideální pro jemné řízení motoru v nízkých otáčkách, proto byl pro tuto práci vybrán a použit právě tento typ.

4.3 Řídicí křivky

V této sekci budou popsány vlivy řídicích křivek, generovaných regulátorem do jednotlivých silových fází motoru, na jeho chování.

4.3.1 Lichoběžníkové řízení

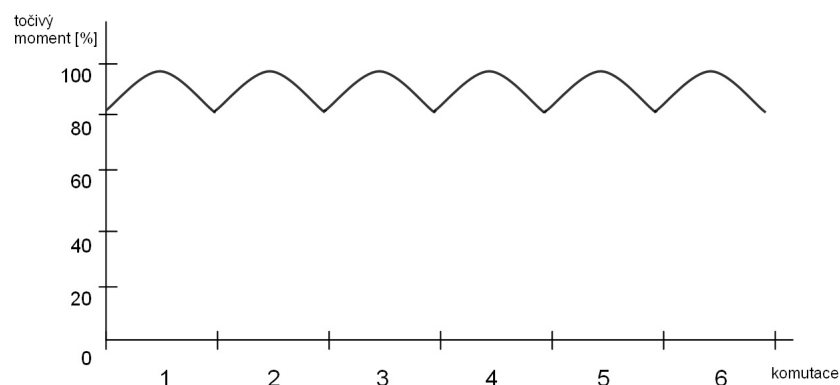
Jedná se o nejjednodušší řízení motoru, které předpokládá prosté spínání a rozpínání jednotlivých fází k pólům zdroje. Při dodržení korektních okamžiků komutace se motor tímto řízením roztočí na nominální otáčky a jeho výkon bude maximální, avšak efektivita motoru nikdy nedosáhne maxima, vzhledem k tomu, že jedna fáze je vždy odpojená a průběh fázových proudů neodpovídá nativnímu průběhu fázových proudů generovaných motorem, kterým je otáčeno vnější silou.

Poměrně jednoduchou úpravou můžeme výkon motoru plynule regulovat. A to spínáním daných výkonových prvků (nejčastěji MOSFET tranzistory) nikoliv přímo, ale pomocí pulzně šířkové modulace (PWM).

Tímto sice dosáhneme plynulé regulace výkonu a potažmo i otáček, avšak momentová charakteristika motoru v nízkých otáčkách nebude vyhovující, jak ukazuje graf 4.2.

4.3.2 Sinusové řízení

Metoda se snaží kopírovat přirozený průběh fázových napěťových křivek motoru, aby bylo odstraněno co nejvíce nežádoucích efektů, popsaných výše. Tohoto je dosaženo pulzně šířkovou modulací všech tří fází najednou zejména podle polohy a požadovaného točivého momentu. Motor řízený touto metodou vykazuje minimální výchylky točivého momentu při nízkých otáčkách, plynulou modulací proudů všech fází se sníží hlučnost a také opotřebení mechanicky namáhaných částí motoru, způsobených vibracemi. Její nevýhodou je výpočetní náročnost, tudíž je vhodné použít výkonnější mikroprocesor regulátoru, aby se předešlo problémům s regulací ve vyšších otáčkách motoru.



Obrázek 4.2: Typická momentová charakteristika motoru při lichoběžníkovém řízení

4.3.3 Navržené řešení

Původně bylo zamýšleno využít sinusového řízení, ale vzhledem k nízkému výpočetnímu výkonu použitého procesoru a nutnosti generovat PWM pomocí softwaru, byl použit modifikovaný algoritmus lichoběžníkového řízení. Vylepšení spočívá ve v kompenzaci typického nerovnoměrného točivého momentu dynamickými změnami PWM pro vyhlazení momentových špiček. Toto řešení se v praxi ukázalo jako uspokojivé a momentová charakteristika byla subjektivně lepší, než v případě běžného řízení.

Kapitola 5

Enkodéry

Enkodér je zařízení, které převádí mechanický pohyb, ať už posuvný nebo rotační na elektrické signály, které mohou být dále zpracovávány. Zpravidla jsou výstupní signály digitální, avšak existují i enkodéry s analogovými výstupy.

Enkodéry obecně se používají zejména v průmyslu pro řízení motorů, servomotorů, dále v robotice, modelářství apod. Najdou uplatnění všude tam, kde je třeba znát polohu nebo rychlost. Enkodéry mohou být lineární, kdy slouží jako zpětná vazba hlavně pro posuvný pohyb v jedné ose nebo rotační, kdy bývají uchyceny společné hřídeli s otáčivým zařízením, u kterého potřebujeme veličiny sledovat.

Existuje velké množství enkodérů pro speciální účely, avšak zde budou popsány pouze některé rotační enkodéry, jež mohou být použity pro řízení motorů.

5.1 Konstrukce

Z mnoha konstrukčních řešení je možné rozdělit enkodéry dle fyzikálních jevů, kterých využívají k získávání dat. Konstrukčně jsou enkodéry velmi přesná zařízení a na výrobu, zejména průmyslových enkodérů, jsou kladeny nemalé nároky na výrobní odchylky, na odolnost proti různým vlivům prostředí, apod., což se většinou negativně odráží v jejich ceně.

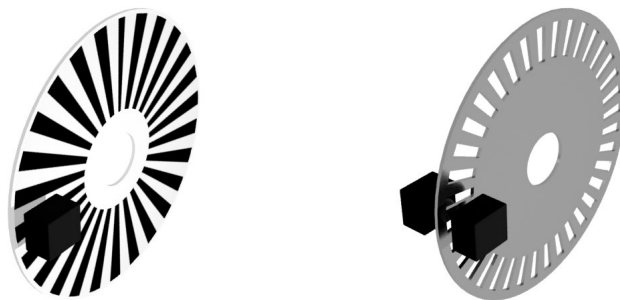
Poměrně rozšířené jsou optické enkodéry, kdy se zpravidla využívá infračerveného světla pro detekci dvou různých stavů.

Buďto jde o odrazivé(reflexní) enkodéry, u kterých se na disku enkodéru střídají reflexní(často bílé) a matné(typicky černé) plošky a zdroj záření je umístěn na stejné straně kódového disku, jako jeho detektor.

U preciznějších systémů se používá transmisivního principu, kdy se umísťuje zdroj a detektor světla proti sobě. Na disku enkodéru se poté střídají plochy pro dané záření odrazivé a průchozí.

Potřebujeme-li použít enkodér v místech se silným znečištěním, je řešením buď celý enkodér uzavřít do neprodyšného obalu nebo využít jevů a materiálů, které nemění své vlastnosti v závislosti na čistotě disku enkodéru a prostředí.

Velmi používaný je tzv. Hallův jev, při kterém se využívá vlastností některých polovodičů zvyšovat svůj odpor, pokud se nachází v magnetickém poli. Tento jev se uplatňuje např. při bezkontaktním měření proudu a vůbec při detekci magnetického pole.

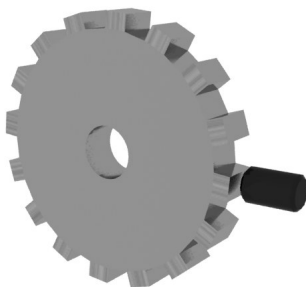


Obrázek 5.1: Konstrukce reflexního (vlevo) a transmisivního enkodéru (vpravo)

5.2 Hallové sondy

Pro snímání polohy rotoru u BLDC motorů se používají Hallové sondy s předzesíleným výstupem, který dává úrovně 0-5V. Umisťují se buď dovnitř motoru, aby bylo využito magnetického pole generovaného přímo permanentními magnety nebo na disk společné hřídeli s motorem, který je vyroben z materiálu detekovatelného sondou. Jak již bylo zmíněno, u BLDC motorů se používá pro každou fázi jedna Hallova sonda. Typicky tedy 3. Ideální případ je, když hrany generované sondami odpovídají optimálním komutačním okamžikům.

Hallové sondy se používají i v jiných typech enkodérů, např. v jednoduchých nebo kvadrantních inkrementálních enkodérech. Výstupní signál z těchto enkodérů má odlišnou charakteristiku oproti Hallovým sondám uvnitř motoru (zpravidla obdélníkový tvar) a pro užití v řízení BLDC motoru se příliš nehodí, avšak princip snímání z kódového disku na základě Hallova jevu je prakticky stejný.



Obrázek 5.2: Konstrukce inkrementálního rotačního enkodéru s využitím Hallové sondy

5.3 Optické inkrementální

Mohou být buď reflexní nebo transmisivní. Pro snadnější popis bude v této sekci nahlíženo na transmisivní typ. Na kódovém disku jsou rozmístěny radiálně plošky, které střídavě propouštějí nebo odrážejí záření. Počet těchto plošek na jednu otáčku může být řádově od jednotek, až po tisíce. Dále se rozlišují počtem drah, které rozšiřují možnosti použití enkodéru.

5.3.1 Jednoduché

Obsahují pouze jednu dráhu, jsou tedy jednokanálové a jejich výstupem je jeden obdélníkový signál. Měřením doby mezi jednotlivými hranami je možné poměrně přesně zjistit rychlost otáčení, případně zrychlení, avšak už se nedovíme nic o jeho směru.

Pro řízení BLDC motoru jsou samostatně naprosto nevhodné, vzhledem k tomu, že nám nepodá žádnou informaci o poloze motoru.

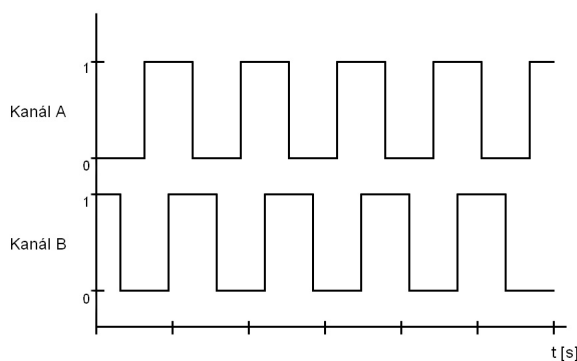
5.3.2 Kvadrurní

Oproti jednoduchému enkodéru má kvadrurní buď dvě dráhy, přičemž každá má vlastní detektor nebo jednu dráhu a na ní fázově posunuté dva detektory. Důležité je, že tento enkodér je již dvoukanálový a oba kanály jsou od sebe fázově posunuty o 90° . Zpravidla se tyto kanály označují *A* a *B*. Díky jejich posunu dostáváme možnost zjistit kromě rychlosti i směr otáčení. V praxi se detekuje náběžná nebo sestupná hrana kanálu *A*, přičemž se v tomtéž okamžiku přihlíží na stav kanálu *B*. Má-li při náběžné hraně kanálu *A* kanál *B* hodnotu logické 1 v určitém směru otáčení, bude mít hodnotu logické 0 ve směru opačném.

Ani tato informace navíc nám však o absolutní poloze motoru nic neřekne. Vyrábějí se ovšem i enkodéry, které obsahují ještě třetí kanál, označovaný většinou *Z*, který je ve fázi s kanálem *A*, avšak dává pouze jediný signál za jednu otáčku. Tento signál bývá nazýván indexový a můžeme jej považovat za jakýsi počátek čítání.

S tímto signálem jsme již schopni, přidanou logikou v softwaru regulátoru, určit absolutní polohu motoru, dokonce i s dostatečnou přesností. Problémem však zůstává start systému, kdy absolutní poloha není známa až do doby, kdy se enkodér dostane na indexovací bod. Pro tuto práci práci není ani tento typ enkodéru vhodný, ačkoliv je cenově výhodnější, než absolutní enkodér.

Kvadrurní rotační enkodéry se však běžně používají v pokročilejších řízeních asynchronních motorů, kdy zlepšují celkové regulační vlastnosti i odezvu systému.



Obrázek 5.3: Typický výstup dvoukanálového kvadrurního enkodéru. Jednoduchý enkodér by obsahoval pouze jeden kanál.

5.4 Optické absolutní

Složitějším typem jsou absolutní rotační enkodéry. Jejich základní vlastností je, že jsou schopny v jakékoliv poloze a časovém okamžiku poskytnout informaci o absolutní poloze.

Toto se realizuje zvýšením počtu drah a jejich detektorů, přičemž počet drah odpovídá bitovému rozlišení enkodéru. Existují ale i enkodéry, které mají vyšší bitové rozlišení, než je počet drah, toho je dosaženo dopočítáváním z pomocných drah enkodéru a přidáním logikou přímo v enkodéru.

Přesnost těchto enkodérů bývá velmi vysoká, běžná hodnota je např. 13 bitů na jednu otáčku, což je $2^{13} = 8192$ poloh. Avšak ani vyšší bitové rozlišení nejsou výjimkou.

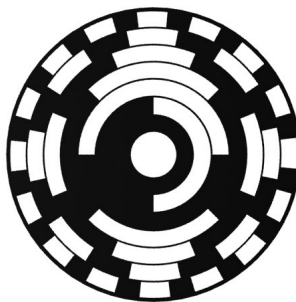
Vysoký počet drah s sebou nese nutnost zpracování základních signálů přímo v enkodéru, protože vést vodič pro každý signál dráhy by bylo velmi nešikovné. Kvalitnější absolutní enkodéry jsou proto většinou schopny posílat informaci o poloze, případně další pomocná data sériově.

Kódování na disku enkodéru může být klasické binární, s tím se však setkáme žřídka, vzhledem k tomu, že v praxi nepřesností, danou mechanickým umístěním, dochází časovým prodlevám mezi přechody, které by měly nastat současně.

Typickým příkladem je přechod z polohy, která odpovídá nule do hodnoty, která odpovídá rozlišení enkodéru. Například u 3-bitového enkodéru přechod z polohy 000 do polohy 111. Mění se stav všech tří drah, avšak toto nikdy nenastane v naprosto stejný okamžik a tak budeme-li vyčítat data právě v okamžik přechodu těchto dvou poloh, výstupem může být náhodná kombinace logických hodnot všech drah.

Řešením tohoto problému je kódování disků enkodérů pomocí tzv. Grayova kódu. V podstatě se jedná o modifikovaný binární kód, který splňuje základní podmínku – v každém přechodu se mění logická hodnota pouze jedné dráhy.

Za cenu zpětného převodu z Grayova kódu do na binární číslo (ať už přímo v enkodéru nebo v logice regulátoru) získáváme přesné a korektní informace o poloze.



Obrázek 5.4: Ukázka kódomého disku absolutního 6-bitového rotačního enkodéru, využívajícího Grayův kód

Vysoká náročnost na přesnost výroby, nutnost zpracování signálů, velký počet drah a podobné faktory jsou důvodem vysoké ceny těchto enkodérů, což je hlavním důvodem jejich nízké užívanosti.

I přes jeho některé nevýhody byl pro řízení BLDC motoru v režimu nízkých otáček byl vybrán právě tento typ enkodéru.

5.4.1 Avago AEAS 7000

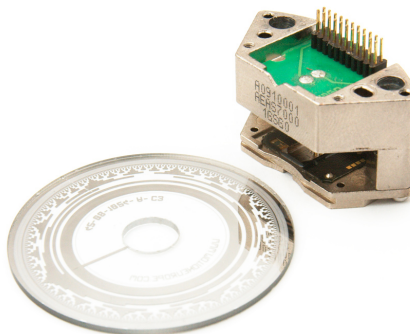
Tento enkodér byl zvolen pro tuto práci z několika důvodů. Oproti jiným, podobným je jeho cena poměrně nízká, dále poskytuje vysoké rozlišení až 16 bitů, jeho napájecí napětí je 5 V, což je výhodné vzhledem k použitému hardwaru, stejně jako fakt, že je schopen komunikovat přes rozhraní SPI. Při nejvyšší frekvenci je možné přenést 16-bitové slovo za 1 μ s.

Následující tabulka shrnuje základní vlastnosti enkodéru [4]:

- 11 digitálních drah
- 2 sinové / kosinové dráhy
- celkově až 16-bitové rozlišení
- jednobitová korekce kódu přímo v enkodéru
- SPI komunikace až na frekvenci 16 MHz
- integrovaný osvětlovací systém
- možnost invertování nejvýznamnějšího bitu

I přes jednu z jeho klíčových udávaných vlastností – snadnost instalace a minimum času stráveného nad kalibrací, právě toto se v praxi ukázalo jako jeho hlavní nevýhoda, jež je dána jeho modulárností. Bylo tedy nutné vyrobit hřídelku a přípravky pro uchycení s maximální tolerancí 10 μ m, což se ukázalo jako poměrně problematické.

Enkodér je dodáván ve dvou částech. Kódový disk a čtecí hlava. Tyto dvě zařízení bylo nutné zaintegrovat do pohonu dle pokynů v návodu výrobce a propojit s motorem.



Obrázek 5.5: Absolutní rotační enkodér Avago AEAS 7000. Kódový disk a čtecí hlava.

Kalibrace a celkové vyladění takto jemného enkodéru bylo poměrně pracnou záležitostí, ztěžovanou navíc jeho nesprávnou funkčností v rozsahu napětí, udávaném výrobcem. Toto bylo v praxi předmětem poměrně dlouhého zkoumání, jelikož v rozmezí napětí 4,5 – 6 V byla výstupní data enkodéru silně chybová.

Příčinou se zdála být nekvalitní kolimace optického systému a s tím spojené ovlivňování fotosenzorů jednotlivých drah okolními.

Náhodou pak bylo zjištěno, že se enkodér chová poměrně korektně při napájecím napětí nižším, než 4 V. To umožnilo jeho použití i přesto, že výstupní úrovně signálů neodpovídaly úrovní TTL (0 – 5 V), ale logická jednička měla hodnotu napájecího napětí.

Kapitola 6

Hardware regulátoru

V této kapitole bude popsán zvolený hardware regulátoru, důvody pro jeho výběr, budou diskutovány jeho hlavní součásti a případné návrhy na vylepšení.

6.1 Požadavky na hardware

6.1.1 Mikrokontrolér

Základem většiny regulátorů je jednočipový mikropočítač. Existují i hardwarové, jednočipové regulátory BLDC motorů, ale jsou přímo stavěné na konkrétní podmínky a jejich vlastnosti není možné nijak měnit. Pro snadnou programovatelnost a univerzalitu se tedy více používá pro implementaci logiky softwarové řešení.

Je tedy nutný správný výběr mikrokontroléru, na který jsou kladeny jisté nároky.

Je poměrně důležité, aby poměr výkon/spotřeba byl co nejlepší, zejména pro systémy napájené baterií článků.

Dále jsou nutné čítače s možností generování PWM. Ideální případ je, pokud jsou tyto čítače 3 (pro každou fázi motoru, avšak celkově je potřeba 6 kanálů) nebo ještě lépe – pokud mikrokontrolér přímo počítá s využitím v řízení motorů a obsahuje výstupy pro řízení výkonové části – často 3-fázového invertoru.

Avšak nedostatky v této oblasti se dají řešit logikou regulátoru. Máme-li k dispozici alespoň jeden časovač s možností generování přerušení v okamžiku shody komparace, můžeme ho využít pro generování softwarové PWM.

Další podstatnou součástí mikrokontroléru jsou komunikační linky. Velmi výhodné je, pokud mikroprocesor podporuje ISP (In System Programming). Například u použitého mikrokontroléru ATMEGA8 je toto realizováno sběrnici SPI. Této sběrnici využijeme nejenom při programování procesoru, ale taktéž za běhu regulátoru pro vyčítání informací z absolutního rotačního enkodéru. Tím se stává sběrnice SPI nezbytnou součástí mikrokontroléru.

Samozřejmě je nutné, aby měl mikrokontrolér dostatečný počet I/O linek (jen pro řízení silových obvodů je nutných 6 linek), což ale obvykle nebývá problém.

Vhodný je také dostatečně rychlý AD převodník, který bývá užíván pro snímání proudu odebíraného ze zdroje, měření teplot silové části nebo také pro ovládání regulátoru.

6.1.2 Napájecí zdroj

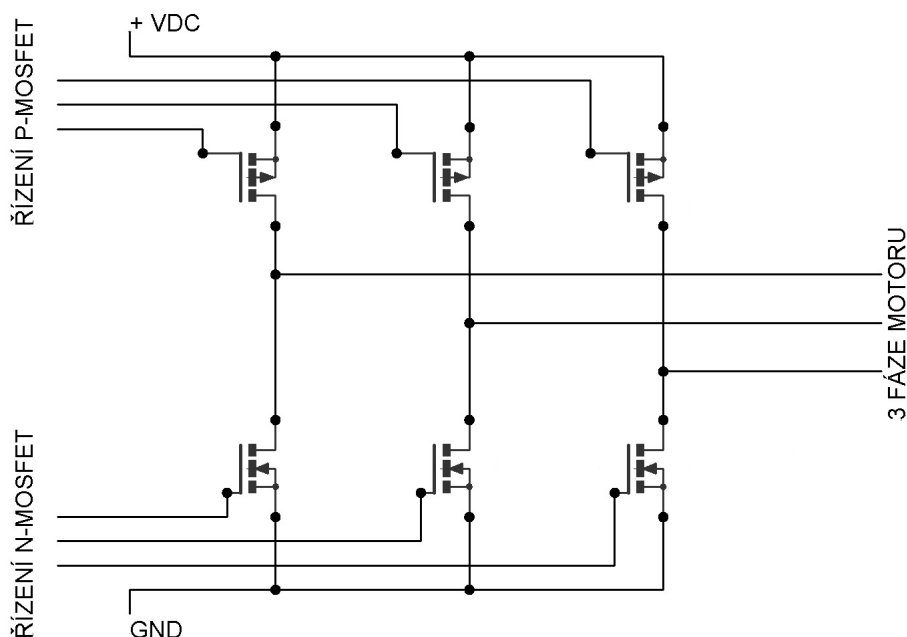
Další velmi důležitou částí regulátoru je napájecí zdroj. Na ten jsou kladeny nároky z hlediska výstupních napětí, které generuje. Hlavní je především jejich stabilita. Při provozu

regulátoru vstupní napětí kolísá, což je dáno pulsním charakterem odběru silové části. Motor také může generovat napěťové špičky, které je třeba eliminovat, k tomu je možné použít varistoru pro odvedení těchto špiček do tepla. Naopak podpětí způsobené poměrně vysokým impulsním proudem odebíraným ze zdroje se může řešit kondenzátory, které si udrží napětí po jistou dobu, danou jejich kapacitou.

6.1.3 Silové spínací obvody

Pro spínání jednotlivých silových fází motoru je nutné osadit regulátor výkonovými spínacími prvky. V principu jde o spínání jednotlivých fází motoru buď k zemi zdroje elektrického proudu nebo k jeho plusové větvi. Existuje několik používaných variant, jak toto provést.

Prakticky výhradně se pro spínání používají tranzistory. Jedná se buď o diskrétní součástky v typickém zapojení níže nebo přímo vyráběné 3-fázové invertory.



Obrázek 6.1: Typické zapojení výkonové spínací části. Zde je použito pro spínání horních fází P-MOSFETů a pro spodní fáze N-MOSFETy

Pro aplikace řádově do 100 VDC, je vhodné použít jako spínacích prvků MOSFETy (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Jejich výhody jsou nesporné – vysoká účinnost, nízké tepelné vyzařování, malý úbytek napětí, ale zejména jsou řízeny napětím, nikoliv tedy proudem, jak je to u klasických tranzistorů.

Unipolární tranzistory se dají použít v regulátoru buď tak, že pro spínání ke kladnému pólu zdroje se používají tranzistory s vodivostí typu P a zápornému pólu s vodivostí typu N.

Toto poměrně jednoduché zapojení, schématicky znázorněné na obrázku 6.1 má jednu zásadní nevýhodu, kterou je v současnosti nedostatečná kvalita unipolárních tranzistorů typu P. Ty mají, oproti N-FETům nižší účinnost a navíc k vysokovýkonným tranzistorům typu N neexistují stejně výkonné protějšky.

Pro účinnostní rovnováhu mezi horními a dolními tranzistory se dá použít namísto P-FETů tranzistory s vodivostí typu N. To s sebou však nese problém jejich řízení. Po sepnutí tranzistoru se napětí mezi gate a source vývody tranzistoru (řídící napětí) začne blížit k nule, což má za následek přechod tranzistoru do stavu s vysokým přechodovým odporem, čím jeho intenzivní zahřívání, až zničení.

Pro řízení takových výkonových částí se proto většinou používají speciální integrované obvody.

Je-li motor dimenzován na vyšší napětí (běžné jsou motory využívající napětí 600 VDC), MOSFET technologie v současnosti neposkytuje přijatelné řešení. Zde se používají IGBT tranzistory (Insulated Gate Bipolar Transistor), které sice nemají tak dobrou účinnost jako IGBT tranzistory, zejména v nízkonapěťových aplikacích, jelikož mají pevný úbytek napětí na polovodičových přechodech (typicky 0,7 V/přechod, čili celkově 1,4 V) a s tím související tepelné ztráty. Jelikož jejich využití je hlavně při regulaci vyššího napětí, úbytky na polovodičových přechodech jsou jen nízkou procentuelní ztrátou.

6.2 Zpětné vazby

Kromě hlavní zpětné vazby pro řízení motoru – enkodéru, je výhodné mít další, které umožní dosáhnout požadovaných regulačních charakteristik.

6.2.1 Čidla proudu

Pro některé metody řízení převzaté z asynchronních motorů je nezbytné mít v každém okamžiku informaci o proudu, který prochází jednotlivými fázemi. To vyžaduje nejenom přidaný hardware, kterým mohou být prosté bočníky nebo Hallovy sondy určené pro měření proudu, ale také dostatečnou rychlost vzorkování A/D převodníku, aby bylo možné tyto informace použít při časově kritických operacích řízení motoru. Není-li k dispozici odebíraný proud jednotlivých fází, je v praxi takřka nezbytné mít informaci alespoň o celkovém proudu odebíraném z baterie. Toto umožní ochranu před zničením hardwaru vlivem nadproudu.

6.2.2 Obvod pro měření BEMF

U bezsenzorových regulátorů je nutné náhradní zapojení BLDC motoru (reprezentované rezistory zapojenými do hvězdy), aby bylo možné detekovat zpětné elektromotorické napětí generované motorem a na základě jeho měření řídit okamžiky komutace motoru.

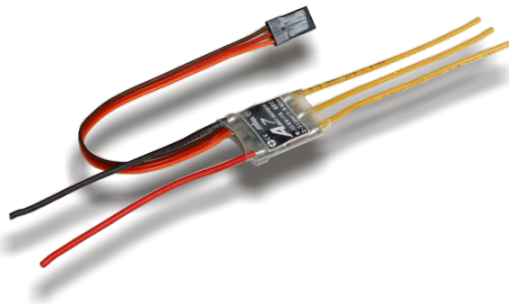
6.2.3 Další obvody

Pro zlepšení spolehlivosti systému může regulátor např. obsahovat čidla teploty – ať už jen silové části nebo i motoru. Dále pro ochranu baterií systém měření jejich napětí apod.

6.3 Výběr regulátoru

Existují vývojové kity, které jsou přímo určeny pro řízení BLDC motorů, které v sobě obsahují mikroprocesor užívaný právě pro řízení třífázových motorů (například ATMEGA32M1 firmy Atmel), výkonovou část a často i samotný BLDC motor s Hallovými sondami. Avšak největší překážkou pro jejich použití v tomto projektu byla jejich cena. Proto bylo nutné

najít k těmto kitům alternativu. Naskytla se možnost použití komerčního řešení bezsenzorového BLDC regulátoru od firmy MGM Compro.



Obrázek 6.2: Použitý regulátor firmy MGM Compro. [9]

Nakonec bylo zvoleno právě toto řešení a i přestože regulátor nebyl navrhován k použití senzorového řízení, jeho jednoduchou úpravou bylo možno dosáhnout téměř všech požadovaných parametrů.

Zhodnocení vlastností regulátoru pro tuto aplikaci:

Klady:

- vyvedena sběrnice SPI
- jednodušší řízení MOSFETů díky použití typů N i P
- použit procesor Atmel ATMEGA8L – snadné programování

Zápory:

- absence proudových čidel na silových fázích
- nižší proudová zatížitelnost MOSFETů
- málo vyvedených I/O pinů procesoru pro obecné použití
- nízký výkon procesoru pro složitější řízení

Kapitola 7

Software regulátoru

Veškerý software pro mikrokontrolér ATMEGA8[3] byl vyvíjen v prostředí Atmel AVR Studio v jazyce C.

Kvůli poměrně nízkému výpočetnímu výkonu procesoru (při použité frekvenci 8 MHz interního RC oscilátoru – cca 8 MIPS) a nutnosti generování PWM softwarem byl kladen důraz na jednoduchost.

Komplexita řízení BLDC motoru pomocí absolutního enkodéru je v porovnání s bezsenzorovým řízením jednodušší, jelikož máme v každém časovém okamžiku informaci o poloze motoru a není tedy nutné tuto polohu zjišťovat nebo odhadovat.

7.1 Základní architektura

Architektura regulátoru je postavena na základním principu nastavení regulovaných parametrů podle nasnímaných zpětných vazeb. Toto se děje v kódu obsluhy přerušení vyvolaného komparací 16-bitového čítače.

Zde se jako první provede obsluha PWM a nastavení příslušných komutačních konfigurací. Dále se zpracují zpětné vazby pro další nastavení výstupních parametrů.

7.2 SPI rozhraní

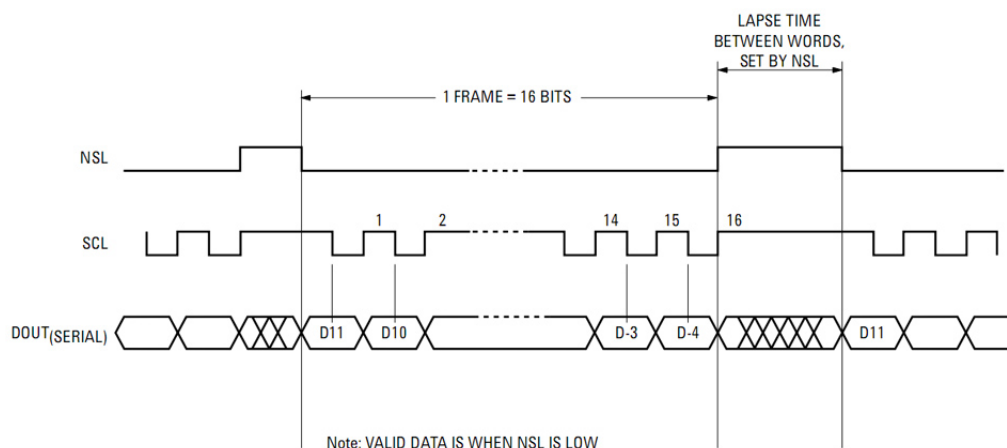
Základním faktorem pro správnou komutaci a řízení je informace od enkodéru. Ten je spojen s regulátorem sběrnici SPI (sériové periferní rozhraní). SPI pro komunikaci používá signálů SCK (řídící hodinový signál přenosu), MOSI (Master Output Slave Input), MISO (Master Input Slave Output) a SS (Slave Select) proto je také někdy nazýváno čtyřvodičové.

Přenos dat je u tohoto rozhraní full-duplexní, avšak v této aplikaci je použito pouze směru komunikace směrem z enkodéru do mikrokontroléru.

Rychlost komunikace SPI je dána frekvencí oscilátoru mikrokontroléru nebo jejími násobky určenými dělicí hodnotou v registru SPCR (SPI Control Register).

I přestože je enkodér navržen na frekvenci až 16 MHz, v praxi se ukázalo, že relativně spolehlivého přenosu byl schopen až při rychlosti $f_{osc}/64 = 125\text{ kHz}$.

Implementačně pracuje mikrokontrolér v režimu master a enkodér jako slave. Vzhledem k tomu, že signál Slave Select, použitelný pro aktivaci přenosu – na obrázku 7.1 signál NSL, je v hardwaru určen výrobcem jako řídící signál jedno ze silových prvků, bylo nutné použít jiný volný I/O signál. Byl zvolen pin PD3 na portu D mikrokontroléru.



Obrázek 7.1: Časový digram komunikace absolutního enkodéru AVAGO AEAS-7000 přes SPI. [4]

Vzhledem k 8-bitové šířce slova přenášeného přes SPI bylo zvoleno právě 8 nejvýznamnějších bitů z enkodéru, jakožto informace dostačující pro řízení motoru.

7.3 Generování PWM

Řízení výkonových prvků, tím i celá regulace a řízení motoru je realizováno pomocí PWM.

ATMEGA8 sice nabízí možnost generování časově a fázově korektní PWM přímo v hardwaru pomocí dvou časovačů, pro řízení BLDC motoru je však třeba mít 6 kanálů, které však navíc negenerují PWM současně, ale zpravidla jen dva z nich (v závislosti na metodě řízení).

Proto bylo nutné přistoupit ke generování PWM pomocí softwaru. Existuje několik přístupů k řešení problému generování PWM. V této aplikaci bylo využito obsluhy přerušení 16-bitového čítače při komparační shodě.

Hodnota časovače, při které se vyvolá přerušení, dává nejnižší časové rozlišení, na jakém je schopen software reagovat.

7.3.1 Obsluha přerušení

Jako první je nutné obsloužit silové výstupy jednotlivých fází motoru. Prakticky je to realizováno proměnnou *currentpwm*, která je inkrementována až do hodnoty dané proměnnou *pwmres*, poté je proměnná nulována.

Při každém přerušení se testuje, zda požadovaná šířka pulzu, uvedené v proměnné *softpwm* je nad nebo pod hranicí současné *currentpwm*. Podle toho se buď odpovídající výstupy nastaví do logické 1 nebo 0.

Dosáhne-li se konce jednoho PWM cyklu, pro jistotu se nastaví všechny silové výstupy do nuly a přejde se k fázi vyčítání zpětných vazeb.

Dojde k přenosu dat z enkodéru skrz SPI, ty se zpracují a pokračuje se novým PWM cyklem.

7.4 Zpracování zpětných vazeb

Vyčtením dat z enkodéru funkcí *getEncData()* dostaneme 8-bitový Grayův kód. Tento už by znamenal dostačující informaci pro rozhodnutí, která komutační fáze je momentálně aktuální, avšak pro jednodušší možnosti zpracování je Grayův kód převeden na běžné binární číslo look-up tabulkou (není přepočítávám z důvodů rychlosti). Toto číslo poté můžeme korigovat proměnnou *offset*, která v podstatě odpovídá natočení kódového disku enkodéru oproti motoru. Touto hodnotou je možné ovlivňovat předstih motoru a řídit jím i případné dynamické brždění.

Výsledná hodnota je již indexem do další tabulky *pwmArray[]*, která reprezentuje jak konfiguraci silových fází motoru, tak procentuální hodnoty PWM pro korekce vibrací točivého momentu.

8-bitový typ hodnot v tabulce je rozdělen na první 3 bity, které kódují jednu z 6 komutačních sekvencí a 5 bitů udávajících korekci PWM.

Tyto informace se uloží do konfiguračních bytů horních a dolních spínacích prvků a také do proměnné požadované PWM a jsou použity v následujícím PWM cyklu.

Kapitola 8

Závěr

V této bakalářské práci se podařilo přestavět robota Traxster na pohon pomocí BLDC motoru. Tento typ pohonu je velmi perspektivní vzhledem ke svým vlastnostem a domnívám se, že bylo velmi přínosné se seznámit s jeho řízením.

I přestože navržený regulátor, použitý hardware a konstrukce nejsou příliš použitelné v praxi, získané zkušenosti se budou hodit i v zaměstnání ve firmě EVC Group s.r.o., která se zabývá vývojem elektromobilů.

8.1 Zhodnocení

Navržený regulátor není ze své podstaty univerzálním regulátorem BLDC motorů, avšak jeho přenastavení např. pro motor o jiném počtu pólů je otázkou několika málo změn a v budoucnu by bylo možné toto nastavení provádět pomocí softwaru v PC.

V rámci možností se podařilo implementovat řízení motoru tak, aby mohl být BLDC motor použit i při vyšším točivém momentu za nízkých otáček (což u bezsenzorového řízení možné není), avšak již v průběhu vývoje se objevovaly návrhy na vylepšení a další vývoj.

Především absolutní enkodér byl zvolen poměrně nešťastně, avšak v rozumné cenové relaci nebylo mnoho jiných možností. V průběhu jeho kalibrace a instalace bylo po poměrně dlouhé řadě neúspěšných pokusů náhodou zjištěno, že v napěťovém rozsahu udávaném výrobcem, enkodér nefunguje korektně. Až po snížení napětí pod 4 V (min. udávané výrobcem je 4,5 V) a snížení přenosové rychlosti na méně, než 1/100 maximální udávané, začal podávat korektní data.

Toto významné zdržení ovlivnilo poté i softwarovou část, kterou nebylo možno vytvářet, dokud byla data z enkodéru nepoužitelná. Její ladění, dodělání ochran, ovládání apod. by tak mohlo být předmětem dalšího vývoje.

Dalším návrhem na změnu je použitý mikrokontrolér. V praxi by bylo mnohem výhodnější použít výkonnější model, který je přímo určen pro řízení vícefázových motorů. Toto mikrokontrolery mají přímo hardwarově generované PWM výstupy pro řízení silových částí (v této práci bylo nutné použít softwarově generovanou PWM o nízké modulační frekvenci a rozlišení) a jejich použití dává širší možnosti implementace pokročilejších algoritmů řízení motoru a tím i mnohem lepší charakteristiku motoru.

Pokud by byl použit i vlastní hardware regulátoru, pak by bylo možné implementovat i různé možnosti uživatelského ovládání, což zde prakticky nebylo možné díky pouhé úpravě komerčního řešení.

Literatura

- [1] Atmel Corporation: AVR444: Sensorless control of 3-phase brushless DC motors [online]. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8012.pdf, 2005 [cit. 2010-5-10].
- [2] Atmel Corporation: AVR443: Sensor-based control of three phase Brushless DC motor [online]. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2596.pdf, 2006 [cit. 2010-5-10].
- [3] Atmel Corporation: ATMega8 datasheet [online]. <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2486.pdf>, 2010 [cit. 2010-5-10].
- [4] Avago Technologies: AEAS-7000 Ultra-precision 16 bit Gray Code Absolute Encoder Module [online]. <http://www.avagotech.com/docs/5989-4140EN>, 2006 [cit. 2010-5-10].
- [5] Freescale Semiconductor, Inc.: AN1961 3-Phase BLDC Motor Control with Quadrature Encoder using 56F800/E [online]. http://cache.freescale.com/files/dsp/doc/app_note/AN1961.pdf, 2005 [cit. 2010-5-10].
- [6] Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc.: AN885 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>, 2003 [cit. 2010-5-10].
- [7] Summerour Robotics Corporation: TraxsterTM Assembly manual [online]. http://www.roboticsconnection.com/multimedia/docs/Traxster_Assembly_Manual_v1.0.pdf, 2007-08-19 [cit. 2010-5-10].
- [8] Summerour Robotics Corporation: Serializer WLTM User Guide v2.1 [online]. http://www.roboticsconnection.com/multimedia/docs/SerializerWL_UserGuide_v2.1.pdf, 2008 [cit. 2010-5-10].
- [9] WWW stránky: MGM Compro. <http://mgm-compro.cz>.
- [10] WWW stránky: Robotics Connection. <http://www.roboticsconnection.com>.
- [11] WWW stránky: Wikipedia : Brushless DC electric motor. http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor.

Příloha A

Obsah CD

- Technická zpráva ve formátu pdf a její zdrojové kódy
- Projekt AVR Studia, obsahující zdrojové kódy implementovaného řešení

Příloha B

Technické údaje

Regulátor:

- Výrobce: MGM Compro
- Provozní napětí: 7 – 10 V
- Mikrokontrolér: Atmel ATMEGA8L
- Dodávaný proud: 7 A trvale, 12 A špičkově

Motor

- Výrobce: MP Jet s.r.o.
- Typ: BLDC s rotačním pláštěm
- Počet pólů: 14
- Špičkový výkon: 100 W